

Europäisches Patentamt

European Patent Office

Office européen des brevets



(11) EP 0 932 068 A2

(12) EUROPEAN PATENT APPLICATION

(43) Date of publication:
28.07.1999 Bulletin 1999/30

(51) Int. Cl.⁶: G02F 1/09, H01S 3/06

(21) Application number: 98114541.0

(22) Date of filing: 03.08.1998

(84) Designated Contracting States:
AT BE CH CY DE DK ES FI FR GB GR IE IT LI LU
MC NL PT SE
Designated Extension States:
AL LT LV MK RO SI

(72) Inventors:
• Terahara, Takafumi,
c/o Fujitsu Limited
Kawasaki-shi, Kanagawa 211-8588 (JP)
• Fukushima, Nobuhiko,
c/o Fujitsu Limited
Kawasaki-shi, Kanagawa 211-8588 (JP)

(30) Priority: 23.01.1998 JP 1179598

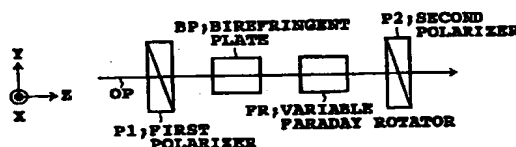
(71) Applicant: FUJITSU LIMITED
Kawasaki-shi, Kanagawa 211-8588 (JP)

(74) Representative: HOFFMANN - EITLE
Patent- und Rechtsanwälte
Arabellastrasse 4
81925 München (DE)

(54) Tunable optical filter

(57) The present invention relates to a tunable optical filter having a variable wavelength characteristic of transmittance. The tunable optical filter includes first and second polarizers each having a transmission axis determining a polarization axis of transmitted polarized light, a birefringent element having an optic axis determining a phase difference given between two orthogonal components of transmitted polarized light, and a Faraday rotator for giving a variable Faraday rotation angle to transmitted polarized light. The birefringent element and the Faraday rotator are provided between the first and second polarizers. The order of arrangement of the birefringent element and the Faraday rotator, and the relative positional relation between the optic axis of the birefringent element and the transmission axis of each polarizer are set so that the shape of a characteristic curve giving a wavelength characteristic of transmittance changes along a transmittance axis according to a change in the Faraday rotation angle.

FIG. 7A



(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開平11-212044

(43) 公開日 平成11年(1999) 8月6日

(51) Int.Cl.⁶

G 0 2 F 1/09

識別記号

5 0 5

F I

G 0 2 F 1/09

5 0 5

審査請求 未請求 請求項の数32 O L (全 23 頁)

(21) 出願番号 特願平10-11795

(22) 出願日 平成10年(1998) 1月23日

(71) 出願人 000005223

富士通株式会社

神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番
1号

(72) 発明者 寺原 隆文

神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番
1号 富士通株式会社内

(72) 発明者 福島 暢洋

神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番
1号 富士通株式会社内

(74) 代理人 弁理士 松本 昂

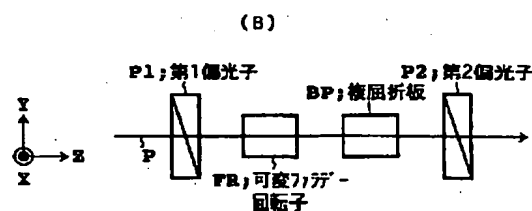
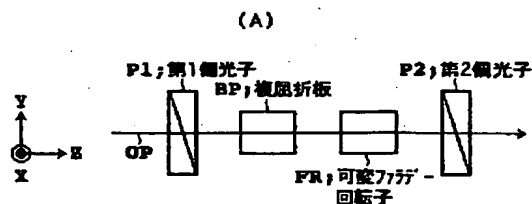
(54) 【発明の名称】 可変光学フィルタ

(57) 【要約】

【課題】 本発明は透過率の波長特性が可変な可変光学フィルタに関し、特性曲線の形状を透過率の軸の方向に変化させることを主な課題としている。

【解決手段】 第1及び第2の偏光子P1、P2と、透過する直交2偏光成分間に与えられる位相差を決定する光学軸を有する複屈折素子BPと、透過する偏光に可変のファラデー回転角を与えるファラデー回転子FRとから構成し、複屈折素子及びファラデー回転子の配列順序並びに光学軸及び各偏光子の透過軸の相対的位置関係を、透過率の波長特性を与える特性曲線の形状がファラデー回転角の変化に従って透過率の軸の方向に変化するようにして構成する。

可変光学フィルタの
第1及び第2実施形態を示す図



【特許請求の範囲】

【請求項1】 各々透過する偏光の偏光軸を決定する透過軸を有する第1及び第2の偏光子と、

上記第1及び第2の偏光子の間に設けられ、透過する直交2偏光成分間に与えられる位相差を決定する光学軸を有する複屈折素子と、

上記第1及び第2の偏光子の間に設けられ、透過する偏光に可変のファラデー回転角を与えるファラデー回転子とを備え、

上記複屈折素子及び上記ファラデー回転子の配列順序並びに上記光学軸及び上記各透過軸の相対的位置関係は、透過率の波長特性を与える特性曲線の形状が上記ファラデー回転角の変化に従って透過率の軸の方向に変化するように設定される可変光学フィルタ。

【請求項2】 請求項1に記載の可変光学フィルタであって、

入力光は上記第1の偏光子に供給され、
上記入力光は予め定められた帯域を有しており、
該予め定められた帯域は上記特性曲線の周期を与える波長幅の1/2よりも小さい可変光学フィルタ。

【請求項3】 請求項1に記載の可変光学フィルタであって、

入力光は上記第1の偏光子に供給され、
上記第2の偏光子は部分偏光子からなる可変光学フィルタ。

【請求項4】 請求項1に記載の可変光学フィルタであって、

上記ファラデー回転子は上記複屈折素子及び上記第2の偏光子の間に設けられ、

入力光は上記第1の偏光子、上記複屈折素子、上記可変ファラデー回転子及び上記第2の偏光子の順に通過し、
上記第1の偏光子の透過軸と上記複屈折素子の光学軸とがなす角を ϕ とするとときに、 $\phi \neq n\pi/2$ (n は整数)を満足する可変光学フィルタ。

【請求項5】 請求項4に記載の可変光学フィルタであって、

上記角 ϕ は $\pi/4$ に等しい可変光学フィルタ。

【請求項6】 請求項5に記載の可変光学フィルタであって、

上記第1及び第2の偏光子の透過軸は互いに平行である可変光学フィルタ。

【請求項7】 請求項5に記載の可変光学フィルタであって、

上記第2の偏光子の透過軸は上記複屈折素子の光学軸に平行である可変光学フィルタ。

【請求項8】 請求項4に記載の可変光学フィルタであって、

上記角 ϕ は $\pi/4$ と異なる可変光学フィルタ。

【請求項9】 請求項4に記載の可変光学フィルタであって、

上記第1の偏光子及び上記複屈折素子の間に設けられる1/4波長板を更に備えた可変光学フィルタ。

【請求項10】 請求項1に記載の可変光学フィルタであって、

上記ファラデー回転子は上記第1の偏光子及び上記複屈折素子の間に設けられ、

入力光は上記第1の偏光子、上記ファラデー回転子、上記複屈折素子及び上記第2の偏光子の順に通過し、

上記複屈折素子の光学軸と上記第2の偏光子の透過軸とがなす角を θ とするとときに、 $\theta \neq n\pi/2$ (n は整数)を満足する可変光学フィルタ。

【請求項11】 請求項10に記載の可変光学フィルタであって、

上記角 θ は $\pi/4$ に等しい可変光学フィルタ。

【請求項12】 請求項11に記載の可変光学フィルタであって、

上記第1及び第2の偏光子の透過軸は互いに平行である可変光学フィルタ。

【請求項13】 請求項11に記載の可変光学フィルタであって、

上記第2の偏光子の透過軸は上記複屈折素子の光学軸に平行である可変光学フィルタ。

【請求項14】 請求項10に記載の可変光学フィルタであって、

上記角 θ は $\pi/4$ と異なる可変光学フィルタ。

【請求項15】 請求項10に記載の可変光学フィルタであって、

上記複屈折素子及び上記第2の偏光子の間に設けられる1/4波長板を更に備えた可変光学フィルタ。

【請求項16】 請求項1に記載の可変光学フィルタであって、

上記ファラデー回転子は第1及び第2のファラデー回転子からなり、

上記複屈折素子は上記第1及び第2のファラデー回転子の間に設けられ、

入力光は上記第1の偏光子、上記第1のファラデー回転子、上記複屈折板、上記第2のファラデー回転子及び上記第2の偏光子の順に通過する可変光学フィルタ。

【請求項17】 請求項16に記載の可変光学フィルタであって、

上記第1のファラデー回転子のファラデー回転角と上記第2のファラデー回転子のファラデー回転角とが実質的に等しくなるように上記第1及び第2のファラデー回転子を制御する手段を更に備えた可変光学フィルタ。

【請求項18】 請求項1に記載の可変光学フィルタであって、

上記複屈折素子は第1及び第2の複屈折素子からなり、
上記ファラデー回転子は上記第1及び第2の複屈折素子の間に設けられ、

入力光は上記第1の偏光子、上記第1の複屈折素子、上

記ファラデー回転子、上記第2の複屈折素子及び上記第2の偏光子の順に通過する可変光学フィルタ。

【請求項19】 請求項18に記載の可変光学フィルタであって、
上記第1及び第2の複屈折素子の光学軸は互いに平行である可変光学フィルタ。

【請求項20】 請求項1に記載の可変光学フィルタであって、
上記第1及び第2の偏光子の間に設けられる可変移相子を更に備え、
入力光は上記第1の偏光子に供給される可変光学フィルタ。

【請求項21】 請求項20に記載の可変光学フィルタであって、
上記可変移相子は、第1及び第2の $1/4$ 波長板と、該第1及び第2の $1/4$ 波長板の間に設けられるもう1つの可変ファラデー回転子とを備えている可変光学フィルタ。

【請求項22】 請求項1に記載の可変光学フィルタであって、
上記ファラデー回転子は、光路上に配置された磁気光学結晶と、互いに異なる方向の第1及び第2磁界をこれらの合成磁界の強さが予め定められた値よりも大きくなるように上記磁気光学結晶に対して印加する磁界印加手段と、上記第1及び第2の磁界の強さの少なくとも一方を変化させる磁界調整手段とを含む可変光学フィルタ。

【請求項23】 請求項22に記載の可変光学フィルタであって、
上記第1及び第2磁界は上記磁気光学結晶を透過する光の伝搬方向を含む平面内の互いに直交する方向にそれぞれ印加される可変光学フィルタ。

【請求項24】 請求項22に記載の可変光学フィルタであって、
上記磁界印加手段は上記第1及び第2磁界をそれぞれ印加する電磁石及び永久磁石を含み、上記磁界調整手段は上記電磁石の駆動電流を調整する可変光学フィルタ。

【請求項25】 請求項22に記載の可変光学フィルタであって、
上記磁界印加手段は上記第1及び第2磁界をそれぞれ印加する第1及び第2の電磁石を含み、
上記磁界調整手段は上記第1及び第2の電磁石の駆動電流の少なくとも一方を調整する可変光学フィルタ。

【請求項26】 請求項22に記載の可変光学フィルタであって、
上記予め定められた値は上記磁気光学結晶の磁化が飽和するのに必要とされる磁界の強さに相当する値である可変光学フィルタ。

【請求項27】 請求項1に記載の可変光学フィルタであって、
上記第1及び第2の偏光子はそれぞれ複屈折物質からな

る第1及び第2のくさび板からなり、

該第1及び第2のくさび板は、該第1のくさび板の頂部及び底部がそれぞれ該第2のくさび板の底部及び頂部に対向し且つ対応する面同士が互いに平行になるように配置され、

第1の光ファイバと、該第1の光ファイバからの光を上記第1のくさび板に供給するための第1のレンズと、
上記第2のくさび板からの光を集束させる第2のレンズと、

該第2のレンズにより集束された光ビームが所定の条件の下に結合する第2の光ファイバとを更に備えた可変光学フィルタ。

【請求項28】 請求項27に記載の可変光学フィルタであって、

上記第1及び第2のくさび板の各々の偏光分離角を θ° 、上記第2の光ファイバのコアの直径を a 、上記第2のレンズの焦点距離を f とするとときに、

$$f \sin \theta^\circ < a$$

を満足する可変光学フィルタ。

【請求項29】 請求項1に記載の可変光学フィルタであって、

上記第1の偏光子は複屈折物質からなる第1のくさび板からなり、

上記第2の偏光子はそれぞれ複屈折物質からなる第2及び第3のくさび板からなり、

該第1乃至第3のくさび板は、該第1のくさび板の頂部及び底部がそれぞれ該第2のくさび板の底部及び頂部に対向し、該第2のくさび板の頂部及び底部がそれぞれ該第3のくさび板の底部及び頂部に対向するように配置され、

第1の光ファイバと、

該第1の光ファイバからの光を上記第1のくさび板に供給するための第1のレンズと、

上記第3のくさび板からの光を集束させる第2のレンズと、

該第2のレンズにより集束された光ビームが所定の条件の下に結合する第2の光ファイバとを更に備えた可変光学フィルタ。

【請求項30】 請求項1に記載の可変光学フィルタであって、

上記第1及び第2の偏光子はそれぞれ複屈折物質からなる第1及び第2の平板からなり、

第1の光ファイバと、

該第1の光ファイバからの光を上記第1の平板に供給するための第1のレンズと、

上記第2の平板からの光を集束させる第2のレンズと、

該第2のレンズにより集束された光ビームが所定の条件の下に結合する第2の光ファイバとを更に備えた可変光学フィルタ。

【請求項31】 請求項1に記載の可変光学フィルタで

あって、

上記第1及び第2の偏光子の間に設けられる少なくとも1つのフィルタユニットを更に備え、

該少なくとも1つのフィルタユニットの各々は、上記第1の偏光子、上記複屈折素子及び上記ファラデー回転子にそれぞれ相当するエレメントを含む可変光学フィルタ。

【請求項32】 請求項31に記載の可変光学フィルタであって、

上記第1及び第2の偏光子の間に設けられる可変移相子を更に備え、

上記各フィルタユニットは上記可変移相子に相当するエレメントを更に含む可変光学フィルタ。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、一般的に光ファイバ通信システム等のシステムに適用可能な可変光学フィルタに関し、特に、透過率の波長特性を与える特性曲線の形状が透過率の軸の方向に変化する可変光学フィルタに関する。

【0002】

【従来の技術】近年、低損失（例えば0.2dB/km）な光ファイバの製造技術及び使用技術が確立され、光ファイバを伝送路とする光ファイバ通信システムが実用化されている。また、光ファイバにおける損失を補償して長距離の伝送を可能にするために、信号光を増幅するための光増幅器の使用が提案されあるいは実用化されている。

【0003】従来知られている光増幅器は、増幅されるべき信号光が供給される光増幅媒体と、光増幅媒体が信号光の波長を含む利得帯域を提供するように光増幅媒体をポンピングする手段とを備えている。例えば、エルビウムドープファイバ増幅器（EDFA）は、光増幅媒体としてのエルビウムドープファイバ（EDF）と、予め定められた波長を有するポンプ光をEDFに供給するためのポンプ光源とを備えている。0.98μm帯あるいは1.48μm帯の波長を有するポンプ光を用いることによって、波長1.55μmを含む利得帯域が得られる。また、半導体チップを光増幅媒体として用いる光増幅器も知られている。この場合、半導体チップに電流を注入することによってポンピングが行われる。

【0004】一方、光ファイバによる伝送容量を増大させるための技術として、波長分割多重（WDM）がある。WDMが適用されるシステムにおいては、異なる波長を有する複数の光キャリアが用いられる。各光キャリアを独立に変調することによって得られた複数の光信号が光マルチプレクサにより波長分割多重され、その結果得られたWDM信号光が光ファイバ伝送路へ送出される。受信側では、受けたWDM信号光が光デマルチプレクサによって個々の光信号に分離され、各光信号に基づ

いて伝送データが再生される。従って、WDMを適用することによって当該多重数に応じて一本の光ファイバによる伝送容量を増大させることができる。

【0005】WDMが適用されるシステムに光増幅器を組み入れる場合、しばしば利得傾斜（ゲインチルト）と称される利得特性（利得の波長特性）によって伝送距離が制限される。例えば、EDFAにおいては、波長1.55μmの近傍で利得偏差が生じる。カスケード接続された複数のEDFAについて利得傾斜が累積すると、利得が小さい帯域に含まれるチャネルの光SNR（信号対雑音比）が悪くなる。

【0006】光増幅器の利得傾斜に対処するために、利得等化器を用いることができる。利得傾斜の累積によりあるチャネルの光SNRの劣化が過剰になるよりも前に、適切な位置に設けられた利得等化器によって利得等化が行われる。

【0007】利得等化器として使用可能な光デバイスとして、可変光学フィルタがある。可変光学フィルタにおいては、透過率（又は損失）の波長特性（透過率の波長依存性）が可変である。例えば、光増幅器の利得傾斜を相殺するように可変光学フィルタの波長特性が設定されあるいは制御され、それにより、受信側における光信号のパワーのチャネル間偏差が小さくなる。

【0008】従来、機械的な可動部分を有する可変光学フィルタが知られている。この種の光学フィルタにおいては、例えば、光学干渉膜や回折格子への光ビームの入射角度が機械的に変化させられ、それにより、透過波長帯域の中心波長あるいは阻止波長帯域の中心波長が変化する。即ち、透過率の波長特性を与える特性曲線の形状が波長の軸の方向に変化する。また、フォトニクステクノロジー（Photonics Technologies）社から提供されている可変光学フィルタは、スプリットビームフーリエフィルタ（Split-Beam Fourier Filter）を基本原理としており、機械的な手段により、中心波長だけでなく阻止量（透過率）そのものも可変にしている。即ち、透過率の波長特性を与える特性曲線の形状が波長の軸の方向だけでなく透過率の軸の方向にも可変である。

【0009】また、機械的な可動部分がなく電気的手段によって損失の波長特性を変化させることのできる可変光学フィルタとして、導波路型のマッハツェンダ（Mach-Zehnder: MZ）光学フィルタやアコーストオプティックチューナブルフィルタ（Acousto-Optic Tunable Filter: AOTF）等が知られている。

【0010】更に、複屈折フィルタを基本原理とした中心波長可変の光バンドパスフィルタが提案されている（特開平6-130339号）。

【0011】

【発明が解決しようとする課題】機械的な可動部を有し

ている可変光学フィルタは、高速な動作が困難であり、また信頼性に欠けるという欠点を有している。また、MZ光学フィルタやAOTFには、現在のところ、(1) 駆動電圧が高い、(2) 消費電力が大きい、(3) 温度安定化装置が必要であり大規模化を避けられない、

(4) 信頼性が得られていない、等の欠点がある。

【0012】このため、(1) 機械的な可動部を有しておらず、従って高い信頼性が得られること、(2) 電気的手段によって制御が可能なこと、(3) 駆動電圧が低く消費電力が小さいこと等の条件を満たす可変光学フィルタが要望されている。

【0013】これらの条件を満たす可変光学フィルタの候補としては、特開平6-130339号公報に記載されている可変光学フィルタが挙げられる。この可変光学フィルタは可変なファラデー回転角を与える可変ファラデー回転子を備えており、透過率の波長特性を与える特性曲線の形状がファラデー回転角の変化に従って波長の軸の方向に変化するようにされている。しかし、特性曲線の形状は、透過率の軸の方向に変化することはできない。前述した利得等化器の用途では、例えば阻止波長帯域の損失深さが可変であることが要求されているので、この可変光学フィルタは利得等化器として必ずしも十分な性能を有しているとはいえない。

【0014】よって、本発明の目的は、透過率の波長特性を与える特性曲線の形状が透過率の軸の方向に変化するような可変光学フィルタを提供することにある。本発明の他の目的は以下の説明から明らかになる。

【0015】

【課題を解決するための手段】本発明のある側面によると、第1及び第2の偏光子と、複屈折素子と、ファラデー回転子とを備えた可変光学フィルタが提供される。第1及び第2の偏光子の各々は、透過する偏光の偏光軸を決定する透過軸を有している。複屈折素子は、第1及び第2の偏光子の間に設けられ、透過する直交2偏光成分間に位相差を与える。位相差は複屈折素子の光学軸によって決定される。ファラデー回転子は、第1及び第2の偏光子の間に設けられ、透過する偏光に可変のファラデー回転角を与える。複屈折素子及びファラデー回転子の配列順序と、複屈折素子の光学軸と第1及び第2の偏光子の各々の透過軸との相対的位置関係とは、透過率の波長特性を与える特性曲線の形状がファラデー回転角の変化に従って透過率の軸の方向に変化するように設定される。

【0016】この構成によると、配列順序及び相対的位置関係が特定の形態に設定されているので、特性曲線の形状が透過率の軸の方向に可変になり、例えば、阻止波長帯域の損失深さを変化させることができるようになり、本発明の目的の1つが達成される。

【0017】尚、本願明細書では、「透過率」は電力透過率として定義される。

【0018】

【発明の実施の形態】以下、添付図面を参照して本発明の望ましい実施の形態を詳細に説明する。まず、本発明による可変光学フィルタの構成及び動作を理解する上で有用と思われるので、図1を参照して複屈折フィルタについて説明する。複屈折フィルタは、第1の偏光子P1と、複屈折板BPと、第2の偏光子P2とを、透過光の光路OP上にこの順に配置して構成される。ここでは、光路OPに平行なZ軸を有する直交三次元座標系(X, Y, Z)が採用されている。ここでは、X軸及びY軸は、それぞれ、複屈折板BPの光学軸(C1軸及びC2軸)に平行であり、第1偏光子P1の透過軸とY軸とがなす角度は45°であるとする。第2の偏光子P2の透過軸とY軸とがなす角度は任意である。尚、「偏光子の透過軸」は、透過する直線偏光の振動方向に一致し、より一般的には、その偏光子を透過する偏光の偏光軸を決定する軸として定義される。

【0019】第1の偏光子P1を透過した直線偏光が複屈折板BPに入射すると、この直線偏光は、C1軸に平行な偏光面を有する成分とC2軸に平行な偏光面を有する成分とに分離されて複屈折板BPの内部を伝搬する。これらの2成分は複屈折板BPから出力されるときに、波長に従って決定される位相差の下で合成される。複屈折板BPの厚みが入射光の波長に比べて十分大きい場合、複屈折板BPの出力において合成される光の偏光状態は波長に応じて異なる。即ち、合成された光は、波長によって、直線偏光であるかも知れないし、円偏光又は楕円偏光であるかも知れない。第2の偏光子P2の透過率は、第2の偏光子P2に入射する光の偏光状態に依存するため、波長によって異なる。例えば、第2の偏光子P2の透過軸がある波長の直線偏光に平行になるように固定されているとすると、その波長の光に対する第2の偏光子P2の透過率は原理的に100%となる。これとは異なる波長においては、第2の偏光子P2の透過軸と直交する直線偏光に対しては、第2の偏光子P2の透過率は原理的には0%となる。更に、他の波長の円偏光に対する第2の偏光子P2の透過率は原理的には50%であり、別の波長の楕円偏光に対する第2の偏光子P2の透過率は楕円偏光の楕円率に応じたものとなる。このようにして、この複屈折フィルタの透過率は光の波長に依存して変化することになる。

【0020】図2の(A)及び(B)は従来の可変光学フィルタの特性の例を説明するための図である。例えば、特開平6-130339号公報に記載されている可変光学フィルタでは、図1の複屈折フィルタの複屈折板BPに代えて、ファラデー回転子及び2つの1/4波長板を含む移相子を設け、これにより透過率が波長に対して周期的に変化するような波長特性が得られている。この波長特性を与える特性曲線の形状は、図2の(A)に実線及び破線で示されるように波長の軸の方向に可変で

ある。

【0021】従って、この可変光学フィルタを用いることにより、図2の(B)に示されるように、特性曲線の形状が波長の軸の方向に可変である光バンドパスフィルタを提供することができる。

【0022】図3の(A)及び(B)は、本発明に要求されている可変光学フィルタの特性の例を説明するための図である。図2の(A)では特性曲線の形状が波長の軸の方向に可変であるのに対して、図3の(A)に示されるように、特性曲線の形状が透過率の軸の方向に可変である可変光学フィルタが要求されているものである。具体的には、利得等化器としての使用を考慮して、例えば図3の(B)に示されるように、阻止波長帯域における損失深さが可変であるノッチフィルタの実現が要求されているのである。

【0023】次に、図1の複屈折フィルタについての定量的な解析を行った上でこれを発展させて、図3の

$$\begin{aligned} E \sin \theta + E_2 \cos \theta &= \sin \phi \sin \phi \sin (\omega t + \varepsilon_1) + \cos \phi \cos \theta \sin (\omega t + \varepsilon_2) \\ &= (\sin \phi \sin \theta \cos \varepsilon_1 + \cos \phi \cos \theta \cos \varepsilon_2) \sin \omega t + \\ &\quad (\sin \phi \sin \theta \sin \varepsilon_1 + \cos \phi \cos \theta \sin \varepsilon_2) \cos \varepsilon t \end{aligned}$$

となる。従って、透過光の強度 I は、 $I = \cos^2(\phi + \theta) + \sin(2\phi) \sin(2\theta) \cos^2((\varepsilon_1 - \varepsilon_2)/2)$ となる。複屈折板BPの厚みを d 、複屈折板BPにおける常光線および異常光線の屈折率差を μ 、波長を λ とする

$$I(\lambda) = \cos^2(\phi + \theta) + \sin(2\phi) \sin(2\theta) \cos^2(\pi \mu d / \lambda) \cdots \cdots (1)$$

と表すことができる。(1)式により、透過光強度は、波長依存性を持ち、波長に対して周期的に変化することが分かる。ここで、実際に使用する波長帯域に比べて、波長の値が大きいと、 $1/\lambda$ は、次のように一次関数で近似することができる。

$$1/\lambda = a\lambda + b$$

$$I(\lambda) = \cos^2(\phi + \theta) + \sin(2\phi) \sin(2\theta) \cos^2(\pi \lambda / \text{FSR}) \cdots \cdots (1)'$$

が得られる。ここで、FSR (Free Spectral Range) は、透過率の波長特性における波長周期を表し、次式で与えられる。

$$\text{FSR} = 1/a\mu d \cdots \cdots (2)$$

従って、所要のFSRを得るためには、複屈折板BPの材料によって決定される屈折率差 μ が一定であるとする、複屈折板BPの厚み d を調整すればよいことがわかる。

【0028】さて、(1)式により、角 ϕ 及び/又は角 θ を変化させると、透過光強度も変化することがわかる。図6を参照すると、例えば、角 ϕ を $\pi/4$ (45°) とし、角 θ の値を変化させたときの透過率の波長特性の変化の様子が示されている。縦軸は透過率 (真値) であり、横軸はFSRで規格化された相対波長である。また、角 θ の値として正の値と負の値があるのは、C2軸と透過軸P2Aとの間の相対的な回転方向を示すためであり、これについては後で詳しく説明する。

【0029】角 θ を変化させる直接的な方法は、第2の

(A) 及び (B) に示されるような特性を有する可変光学フィルタを提供するための方法を示す。今、図1の複屈折フィルタにおいて、第1の偏光子P1の透過軸P1Aと、複屈折板BPの光学軸 (C1軸及びC2軸) と、第2の偏光子P2の透過軸P2Aとが、図4に示されるような位置関係にあると仮定する。即ち、透過軸P1AとC2軸とがなす角を ϕ とし、透過軸P2AとC2軸とがなす角を θ とする。

【0024】透過軸P1Aに平行に、直線偏光 $\sin(\omega t)$ が入射した時、複屈折板BPを通過した光のC1軸に平行な成分E1とC2軸に平行な成分E2は、両成分の位相遅れをそれぞれ ε_1 及び ε_2 とすると、それぞれ、

$$E_1 = \sin \phi \sin (\omega t + \varepsilon_1)$$

$$E_2 = \cos \phi \sin (\omega t + \varepsilon_2)$$

と書ける。第2の偏光子P2を出た光の振幅は、

$$\begin{aligned} &\text{と、} \\ &(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) / 2 = \pi \mu d / \lambda \end{aligned}$$

となる。従って、透過光の強度 I は波長 λ の関数 $I(\lambda)$ となり、

例えば、図5に示される様に、波長帯域を $1500\text{nm} \sim 1600\text{nm}$ とすると、 $a = 4.165 \times 10^{-7}$ ($1/\text{nm}^2$)、 $b = 1.291 \times 10^{-3}$ ($1/\text{nm}$) となる。

【0026】従って、 b を無視して相対波長のみを考えると、

偏光子P2の透過軸P2Aを回転することである。現状の技術では、機械的手段を用いずに透過軸が回転することができる偏光子はない。また、機械的な手段を用いれば透過軸を回転する偏光子を提供することができるが、機械的可動部を有している可変光学フィルタは、高速動作が困難であり又信頼性に欠ける等の問題を有している。そこで、本発明では、以下に詳しく説明するように、可変ファラデー回転子を用いる方法が提案される。

【0030】角 θ は、第2の偏光子P2の透過軸P2AがC2軸となす角度であり、第2の偏光子P2へ入射される光の偏光軸と第2の偏光子P2の透過軸P2Aとがなす角度であるということもできる。即ち、「第2の偏光子P2の透過軸P2Aを回転すること」は、「第2の偏光子P2へ入射される光の偏光軸を回転すること」と実質的に同じである。従って、可変のファラデー回転角を与えるファラデー回転子を例えば複屈折板BPと第2の偏光子P2との間に配置し、第2の偏光子P2に入射される偏光の方位角を回転すれば、角 θ が変化したのと

同じ状態を実現することができ、その回転に応じて透過光強度を変化させることが可能である。

【0031】また、同じように、可変ファラデー回転子を第1の偏光子P1と複屈折板BPの間に配置し、複屈折板BPに入射される偏光の方位角を回転すれば、角 ϕ が変化したのと同じ状態を実現することができ、その回転に応じて透過光強度を変化させることが可能である。

【0032】図7の(A)及び(B)を参照すると、それぞれ本発明による可変光学フィルタの第1及び第2実施形態が示されている。図7の(A)に示される第1実施形態では、可変ファラデー回転子FRは複屈折板BPと第2の偏光子P2との間に設けられており、図7の(B)に示される第2実施形態では、可変ファラデー回転子FRは第1の偏光子P1と複屈折板BPとの間に設けられている。

【0033】ここで、第1及び第2実施形態の各々において、本発明による可変光学フィルタを実施するための最も単純で且つ明確な要件を再確認しておく。各実施形態では、複屈折板BP及び可変ファラデー回転子FRは、第1の偏光子P1と第2の偏光子P2との間に設けられる。第1の偏光子P1は、透過する偏光の偏光軸を決定する透過軸P1Aを有しており、第2の偏光子P2は、透過する偏光の偏光軸を決定する透過軸P2Aを有している。複屈折板BPは、透過する直交2偏光成分間に与えられる位相差を決定する光学軸(C1軸及びC2軸あるいはそのいずれか一方)を有している。可変ファラデー回転子FRは、透過する偏光に可変のファラデー回転角を与える。そして、複屈折板BP及び可変ファラデー回転子FRの配列順序と光学軸(例えばC1軸)並びに透過軸P1A及びP2Aの相対的位置関係とは、透過率の波長特性を与える特性曲線の形状がファラデー回転角の変化に従って透過率の軸の方向に変化するように設定される。

【0034】また、複屈折板BPの厚みは、所要のFSRが得られるように設計される。透過率の波長依存性を実現するために、複屈折板BPとしては、 $1/4$ 波長板や $1/2$ 波長板と呼ばれる複屈折板に比べて厚く、具体的には使用される波長よりも十分大きい厚みを有する複屈折板が用いられる。更に具体的には、 20 波長乃至 100 波長に相当する位相差を与えることができる複屈折板が採用される。

【0035】図7の(A)に示される第1実施形態では、入力光は、光路OPに沿って第1の偏光子P1、複屈折板BP、可変ファラデー回転子FR及び第2の偏光子P2をこの順に通過する。

【0036】図7の(B)に示される第2実施形態では、入力光は、光路OPに沿って第1の偏光子P1、可変ファラデー回転子FR、複屈折板BP及び第2の偏光子P2をこの順に通過する。

【0037】図8は本発明による可変光学フィルタの各

実施形態における部材間の位置関係を示す図である。ここでは、直交三次元座標系(X, Y, Z)において、Z軸は光路OPに平行であるとし、Y軸は第1の偏光子P1の透過軸P1Aに平行であるとする。また、 ϕ 、 θ 及び δ を新たにあるいは更に明確に次のように定義する。

【0038】 ϕ : 複屈折板BPのC1軸と第1の偏光子P1の透過軸P1A(Y軸)とがなす角。符号は、Y軸からC1軸に向かって回転するときに右回りとなる角を正とする。

【0039】 θ : 複屈折板BPのC1軸と第2の偏光子P2の透過軸P2Aとがなす角。符号は、透過軸P2AからC1軸に向かって回転するときに右回りとなる角を正とする。

【0040】 δ : 第1の偏光子P1の透過軸P1A(Y軸)と第2の偏光子P2の透過軸P2Aとがなす角。符号は、Y軸から透過軸P2Aに向かって回転するときに右回りとなる角を正とする。

【0041】従って、 $\phi = \theta + \delta$ となる。また、ファラデー回転子FRによって与えられるファラデー回転角 α の符号は、X軸からY軸に向かって回転するときに左回りとなる角を正とする。

【0042】尚、図8において、符号PSで表される楕円(円を含む)及び直線の群は、 $\alpha = 0$ であるとしたときにおける複屈折板BPの出力における偏光状態の波長依存性を表している。

【0043】可変光学フィルタの透過光強度に波長依存性を持たせるためには、(1)式から明かなように、「 $\sin(2\phi) \sin(2\theta)$ が常に0である」という条件を避ける必要がある。このため、図7の(A)に示される第1実施形態のようにファラデー回転子FRを用いて角 θ を実質的に変化させたのと同じ状態を提供する場合には、 $\phi \neq n\pi/2$ (n は整数)とする。また、図7の(B)に示される第2実施形態のように、ファラデー回転子FRを用いて角 ϕ を実質的に変化させたのと同じ状態を提供する場合には、 $\theta \neq n\pi/2$ (n は整数)とする。

【0044】光学理論によれば、光の偏光状態及び光素子とその通過光に及ぼす作用は、 1×2 行列で表されるジョーンズベクトル(Jones Vector)及び 2×2 行列で表されるジョーンズマトリックス(Jones Matrix)により表現される。また、各通過点における光電力は、ジョーンズベクトルの2成分の二乗和で表される。ジョーンズベクトル及びジョーンズマトリックスを用いた行列計算により、本発明による可変光学フィルタの透過率(電力透過率)を計算可能である。

【0045】図9は、図7の(A)に示される第1実施形態における透過率の波長特性を計算した結果を表している。ここでは、 $\phi = \pi/4$ 、 $\delta = 0$ とし、ファラデー回転角 α を変化させている。縦軸は透過率(dB)、横

軸はFSRで規格化された相対波長を表している。ここでは、波長特性を与える特性曲線の形状が、相対波長が0.25及び-0.25である点を不動点として、ファラデー回転角 α に従って透過率の軸（縦軸）の方向に変化していることが明らかである。

【0046】 $\phi = \pi/4$ とした場合には、 $-\delta < \alpha < \pi/2 - \delta$ の範囲（ $\pi/2$ の範囲）で、又は、 $\phi = -\pi/4$ とした場合には、 $-\delta > \alpha > -\pi/2 - \delta$ の範囲（ $\pi/2$ の範囲）でファラデー回転角 α を変化させれば、透過率の波長特性がとり得る全ての状態を実現することができる。

【0047】また、この関係により、 $\delta = 0$ 、即ち透過軸P1A及びP2Aを互いに平行にすると、変化させるファラデー回転角 α の符号は正負どちらか一方だけを選べばよいことがわかる。従って、 $\delta = 0$ とすることにより、 $0 < \alpha < \pi/2$ 又は $0 > \alpha > -\pi/2$ となり、ファラデー回転角 α を一方向だけに与える可変ファラデー回転子FRの構成を簡単にすることができる。このことは、図7の(B)に示される実施形態においても同様である。

【0048】これとは逆に、ファラデー回転角 α を両方向に与えることができる可変ファラデー回転子を用いれば、 $\delta = \phi$ と設定することにより、 $\alpha = 0$ のときに透過率が波長によらず一定になる。例えば、本発明による可変光学フィルタをシステムに組み込んだ場合において、制御オフとなり $\alpha = 0$ となったときに、透過率が波長によらず一定となっていることが望ましい場合がある。また、このときには $-\pi/4 < \alpha < \pi/4$ となるため、ファラデー回転角 α の絶対値は $\pi/4$ より小さくなり、磁気光学効果を応用した可変ファラデー回転子等が用いられている場合に、ファラデー回転角 α を最大値に設定しているときの消費電力を低減することが可能になる。図7の(B)に示される第2実施形態においても同様の議論が成り立ち、その場合には、 $\delta = \theta$ とすればよい。

【0049】図9のような特性を有する可変光学フィルタは、例えば、損失傾斜が可変であるパワー等化器としての応用が考えられる。ここで、「損失傾斜」は、図10に示されるように、透過率を対数表示で表したときの透過率の波長特性を与える特性曲線が直線的であるときに、その傾きを指す。損失傾斜が可変であるパワー等化器は、例えば、光ファイバ通信システムにおいて、光増幅器の利得傾斜を等化する場合や、光ファイバの損失傾斜を補償する場合等に有効である。

【0050】図9に示される特性を有する可変光学フィルタを損失傾斜が可変である等化器として用いる場合には、例えば、次のように使用波長帯域を選ぶことによって、波長帯域内の損失の平均値（以下、「平均損失」と称する。）を一定に保つことが可能になる。即ち、最大損失又は最小損失が得られる幾つかの波長のうち、隣り

合う2つの波長の中心値を使用波長帯域の中心波長に選り、且つ、使用波長帯域の帯域幅をFSRの $1/2$ よりも小さく設定する。

【0051】図11は、図9に示されるグラフにおいて各々最大損失又は最小損失が得られるA点及びB点の中心値を与えるC点を使用波長帯域の中心波長とし、FSRの $1/5$ を使用波長帯域として選んだ例である。損失傾斜が可変である特性が得られていることがわかる。また、この例では、ファラデー回転角 α を変化させても平均損失は変化しないことがわかる。尚、図11のグラフにおいては、各特性曲線が直線的であることを明らかにするために、完全な直線が破線で示されている（図13及び16においても同様）。

【0052】しかしながら、図11の特性を有する可変光学フィルタでは、平均損失が3dBという大きな値となることが欠点である。この問題を解決するためには、以下の2つの方法が考えられる。

【0053】まず、第1の方法は、透過軸P1A及びP2Aのいずれか一方と複屈折板BPのC1軸とがなす角（ ϕ 又は θ ）を $\pm\pi/4$ と異ならせる方法である。例えば、図7の(A)に示される第1実施形態においては、 $0 < \phi < \pi/4$ が満たされるように角 ϕ を設定し、且つ、 $-\delta < \alpha < 2\phi - \delta$ の範囲でファラデー回転角 α を変化させるか、あるいは、 $-\pi/4 < \phi < 0$ が満たされるように角 ϕ を設定し、且つ、 $-\delta > \alpha > 2\phi - \delta$ の範囲でファラデー回転角 α を変化させる。

【0054】図12の(A)及び(B)の各々は、 $\phi = \pi/6$ 、 $\delta = 0$ とし、ファラデー回転角 α を変化させながら透過率の波長特性を計算した結果である。また、図13は図11における相対波長の範囲に準じて図12の(A)及び(B)の各々に示される波長特性を拡大して得られた波長特性を示している。

【0055】図13から明らかなように、図11に示される波長特性と比較して平均損失が小さくなっていることがわかる。但し、図13の例では、ファラデー回転角 α の変化に応じて平均損失が変化することになる。

【0056】図7の(B)に示される第2実施形態においては、 $0 < \theta < \pi/4$ が満たされるように θ を設定し、且つ、 $-\delta > \alpha > -2\theta - \delta$ の範囲でファラデー回転角 α を変化させるか、あるいは、 $-\pi/4 < \theta < 0$ が満たされるように θ を設定し、且つ、 $-\delta < \alpha < -2\theta - \delta$ の範囲でファラデー回転角 α を変化させることによって、図7の(A)の第1実施形態におけるのと同様の効果が得られる。

【0057】尚、第1の方法により角 ϕ 又は角 θ を $\pm\pi/4$ と異なるように設定した場合にも、角 $\delta = 0$ とすることにより、ファラデー回転角 α を一方向だけに与える可変ファラデー回転子を用いることができるようになる。また、図7の(A)に示される第1実施形態においては $\delta = \phi$ とすることにより、また、図7の(B)に示

される第2実施形態においては $\delta = \theta$ とすることにより、制御オフとして $\alpha = 0$ となったときに透過率が波長によらず一定となる効果が得られる。

【0058】角 ϕ 又は角 θ を $\pm \pi/4$ と異ならせることにより得られる効果は、図14の(A)及び(B)の各々に示されるように、 $1/4$ 波長板を適切な位置に適切な角度で挿入し、偏光方位をずらすことによっても実現できることは明かである。

【0059】図14の(A)に示される本発明による可変光学フィルタの第3実施形態は、図7の(A)に示される第1実施形態と対比して、第1の偏光子P1と複屈折板BPとの間に $1/4$ 波長板2が付加的に設けられている点で特徴付けられる。

【0060】図14の(B)に示される本発明による可変光学フィルタの第4実施形態は、図7の(B)に示される第2実施形態と対比して、複屈折板BPと第2の偏光子P2との間に $1/4$ 波長板2'が付加的に設けられている点で特徴付けられる。

【0061】第2の方法は、第2の偏光子P2として部分偏光子を用いる方法である。ここで、「部分偏光子」は、透過軸と直交する偏光面を有する直線偏光の入射に対して、透過率が0(真数)ではないある値を示す偏光子を指す。部分偏光子において、透過軸と直交する偏光面を有する直線偏光の透過率を t と定義する。

【0062】図15は、第2の偏光子P2として $t = 0.25$ (-6 dB)の部分偏光子を用い、 $\phi = \pi/4$ 、 $\delta = 0$ として、ファラデー回転角 α を変化させながら透過率の波長特性を計算した結果を示している。また、図16は図15に示される波長特性の一部を拡大して得られた波長特性を示している。図16に示される特性を図11に示される特性と比較すると、平均損失が小さくなっており、しかも、ファラデー回転角 α の変化に対して平均損失が変化していないことが明かである。

【0063】図7の(A)に示される第1実施形態において第2の方法を実施する場合には、 $\phi = \pm \pi/4$ に設定することにより、可変量(ある波長における透過率の可変範囲)を最大にすることができる。前述したように、透過率の波長特性がとり得る全ての状態を実現することができるからである。また、図7の(B)に示される第2実施形態において第2の方法を実施する場合に、 $\theta = \pm \pi/4$ に設定することにより、同じく可変量を最大にすることができる。第2の方法を実施する場合にも、 $\delta = 0$ とすることにより、一方向にファラデー回転角 α を与える可変ファラデー回転子を用いることができるようになる。また、図7の(A)に示される第1実施形態においては $\delta = \phi$ とすることにより、また、図7の(B)に示される第2実施形態においては $\delta = \theta$ とすることにより、制御オフとして $\alpha = 0$ となったときに透過率が波長によらず一定となる効果が得られる。

【0064】第1及び第2の方法は、最大損失に有限の

値を与えるためにも有効である。例えば、図7の(A)に示される第1実施形態において $\phi = \pi/4$ とした場合、原理的には電力透過率が0(真数)の値をとり得るため、図9から明らかなように、最大損失(dB)は無限大になる。このような特性はシステム運用上好ましくない場合がある。そこで、第1又は第2の方法を用いることにより、最大損失(dB)を有限の値に抑えることが可能となる。このことは、図12の(A)及び(B)並びに図15から明かである。

【0065】図17は本発明による可変光学フィルタの第5実施形態を示す図である。この実施形態は、これまでに説明した実施形態において1つの可変ファラデー回転子FRが用いられているのと対比して、第1の偏光子P1及び第2の偏光子P2の間に2つの可変ファラデー回転子FR1及びFR2が設けられている点で特徴付けられる。複屈折板BPはファラデー回転子FR1及びFR2の間に設けられる。

【0066】この構成によると、これまでに説明した波長特性と異なる波長特性を得ることができる。例えば、 $\phi = \pm \pi/4$ 、 $\delta = n\pi/2$ (n は整数)とし、ファラデー回転子FR1によって与えられるファラデー回転角 α_1 とファラデー回転子FR2によって与えられるファラデー回転角 α_2 を、 $\alpha_1 = \alpha_2$ を保ちながら回転させる場合を考える。

【0067】入力光は、光路OPに沿って、第1の偏光子P1、ファラデー回転子FR1、複屈折板BP、ファラデー回転子FR2及び第2の偏光子P2をこの順に通ずる。

【0068】図18は、 $\phi = \pi/4$ 、 $\delta = 0$ とし、ファラデー回転角 α (α_1 及び α_2)を、 $0 < \alpha < \pi/4$ の範囲で回転させた場合の透過率の波長特性を示している。ここでは、第2の偏光子P2としては部分偏光子が用いられている。

【0069】図18から明らかなように、透過率の波長特性における最小損失が、ファラデー回転角 α によらず常に0となる特性が得られている。このように $\alpha_1 = \alpha_2$ を保ちながら各ファラデー回転角を変化させるために、図17の第5実施形態では、制御ユニット4がファラデー回転子FR1及びFR2に接続されている。制御ユニット4は、ファラデー回転子FR1によって与えられるファラデー回転角 α_1 とファラデー回転子FR2によって与えられるファラデー回転角 α_2 とが実質的に等しくなるようにファラデー回転子FR1及びFR2を制御する。

【0070】図19は本発明による可変光学フィルタの第6実施形態を示す図である。この実施形態は、これまでの実施形態では1つの複屈折板BPが用いられているのと対比して、2つの複屈折板BP1及びBP2が第1の偏光子P1と第2の偏光子P2との間に設けられている点で特徴付けられる。

【0071】可変ファラデー回転子FRは複屈折板BP1及びBP2の間に設けられている。入力光は、光路OPに沿って、第1の偏光子P1、複屈折板BP1、ファラデー回転子FR、複屈折板BP2及び第2の偏光子P2をこの順に通過する。

【0072】このように2つの複屈折板BP1及びBP2を用いることにより、図18に示される波長特性に似た波長特性を得ることができる。例えば、複屈折板BP1及びBP2の光学軸について前述の角 ϕ と同様にそれぞれ定義される角 ϕ_1 及び角 ϕ_2 を等しくし($\phi_1 = \phi_2$)、また、 $\phi_1 = \pm \pi/4$ 、 $\phi_2 = \pm \pi/4$ 、 $\delta = n\pi/2$ (n は整数)とする。

【0073】図20は、 $\phi = \pi/4$ 、 $\delta = 0$ とし、ファラデー回転子FRの回転角 α を $0 < \alpha < \pi/2$ の範囲で回転させた場合における透過率の波長特性を示している。ここでは、第2の偏光子P2として部分偏光子を用いている。

【0074】図20から明らかなように、透過率の波長特性における最小損失がファラデー回転角 α によらず常に0となる波長特性が得られている。また、図19の第6実施形態においても、 $\delta = 0$ とすることにより、一方向に可変のファラデー回転角 α を与えるファラデー回転子を用いることができるようになる。

【0075】図21は本発明による可変光学フィルタの第7実施形態を示す図である。この実施形態は、第1の偏光子P1と第2の偏光子P2との間に設けられる可変移相子6を付加的に備えていることで特徴付けられる。可変移相子6は、その光学軸に平行な偏光成分とそれに直交する偏光成分との間に位相差(リタデーション)を与え、その位相差は可変移相子6に供給される制御信号により可変である。

【0076】第1の偏光子P1、複屈折板BP、可変ファラデー回転子FR及び第2の偏光子P2は図7の

(A)に示される第1実施形態に準じて配置されており、ここでは、可変移相子6は第1の偏光子P1と複屈折板BPとの間に設けられている。

【0077】図21の実施形態によると、透過率の波長特性を与える特性曲線の形状が可変ファラデー回転子FRにより与えられるファラデー回転角の変化に従って透過率の軸の方向に変化するだけでなく、特性曲線の形状は、可変移相子6によって与えられる位相差の変化に従って、波長の軸の方向にも変化するようになる。従って、図3の(A)及び(B)により説明した可変光学フィルタの特性だけでなく、図2の(A)及び(B)により説明した可変光学フィルタの特性も得られることとなる。

【0078】特性曲線の形状を最も有効に波長の軸の方向に変化させるためには、可変移相子6の光学軸と複屈折板BPの光学軸とのなす角度が $n\pi/2$ (n は整数)となっていることが望ましい。

【0079】可変移相子6としては、例えばLiNbO₃等の電気光学効果を応用したものを採用することができる。しかしながら、電気光学効果を応用した可変位相子は、一般に、高い駆動電圧を必要とする。

【0080】図22は本発明による可変光学フィルタの第8実施形態を示す図である。この実施形態では、特定構成の可変移相子6を採用し、可変移相子6の駆動電圧の低減を図っている。

【0081】可変移相子6は、2枚の1/4波長板10及び12と、1/4波長板10及び12間に設けられるもう1つの可変ファラデー回転子8とを備えている。1/4波長板10の光学軸と1/4波長板12の光学軸とのなす角は $\pi/2$ に設定されている。

【0082】1/4波長板10及び12の各々の光学軸と複屈折板BPの光学軸とのなす角を $n\pi/2$ (n は整数)に設定することによって、この可変光学フィルタの透過率の波長特性を与える特性曲線の形状が可変ファラデー回転子8によって与えられるファラデー回転角の変化に従って波長の軸の方向に変化するようになる。

【0083】尚、ファラデー回転子8によって与えられるファラデー回転角が β である場合、可変移相子6によって直交2偏光成分間に与えられる位相差は 2β になる。この原理は、特開平6-130339号公報の開示内容及び周知技術により自明であるので、その説明を省略する。

【0084】図23は本発明による可変光学フィルタの第9実施形態を示す図である。この実施形態は、図22の第8実施形態と対比して、第1の偏光子P1と第2の偏光子P2との間に少なくとも1つのフィルタユニットが付加的に設けられている点で特徴付けられる。

【0085】ここでは、N (N は1より大きい整数) 台のフィルタユニット14 ($\#1, \dots, \#N$) が設けられている。 i (i は $1 \leq i \leq N$ を満たす整数) 番目のフィルタユニット14 ($\#i$) は、それぞれ第1の偏光子P1、可変移相子6、複屈折板BP及び可変ファラデー回転子FRに対応する偏光子P1 ($\#i$)、可変移相子6 ($\#i$)、複屈折板BP ($\#i$) 及びファラデー回転子FR ($\#i$) を含む。

【0086】この可変光学フィルタの全体としての透過率の波長特性は、図22に示される可変光学フィルタの透過率の波長特性と、フィルタユニット14 ($\#1, \dots, \#N$) のそれぞれの透過率の波長特性との和によって与えられるので、透過率の波長特性を任意に設定するのが容易になる。

【0087】例えば、図24の(A)に示されるように、図23の可変光学フィルタにおいて各々透過率の波長特性を与える3つの特性曲線が得られている場合、全体としての透過率の波長特性は3つの特性曲線の和によって与えられるので、図24の(B)に示されるような所望の透過率の波長特性を得ることができるようにな

る。

【0088】ここでは、各フィルタユニット14（#i）が、特性曲線を波長の軸の方向に変化させるための可変移相子6（#i）と、特性曲線を透過率の軸の方向に変化させるための複屈折板BP（#i）及びファラデー回転子FR（#1）とを有しているとしたが、必要に応じて、可変移相子6（#i）あるいは複屈折板BP（#i）及びファラデー回転子FR（#i）を省略するようにしてもよい。

【0089】次に、可変のファラデー回転角を与えるためのファラデー回転子の具体的構成例について説明する。一般に、磁気光学結晶にある磁界（磁場）を印加した状態で、つまり磁気光学結晶をある磁界の中において、例えば直線偏光が磁気光学結晶内を通過すると、その偏光方向（直線偏光の電場ベクトルを含む平面の当該伝搬方向と垂直な平面への投影によって与えられる方向）は、直線偏光の伝搬方向に係わらず常に一定の方向に回転される。

【0090】この現象はファラデー回転と称され、偏光方向の回転角の大きさ（ファラデー回転角）は、印加磁界により生じた磁気光学結晶の磁化の方向及び強さに依存する。具体的には、ファラデー回転角は、磁気光学結晶の磁化の強さの光の伝搬方向の成分の大きさによって決定される。

【0091】従って、磁気光学結晶とこの磁気光学結晶に対して光の伝搬方向と同じ方向に磁界を印加する手段とからファラデー回転子を構成すれば、一見すると印加磁界を調整することによりファラデー回転角を有効に調整することができそうである。

【0092】しかし、ここで考慮しておくべき点は、印加磁界の大きさが比較的小さい場合には、印加磁界による磁気光学結晶の磁化の強さが飽和状態に達せず、磁気光学結晶内に多数の磁区が存在していることである。

【0093】このような多数の磁区の存在は、ファラデー回転角の再現性を悪化させるし、良好な再現性が確保されているとしても、ファラデー回転角の連続な可変を困難にする。また、磁気光学結晶に多数の磁区がある場合には、各磁区間の界面における光の散乱による減衰も生じ、実用上の不都合となる。

【0094】そこで、本発明の望ましい実施形態では、可変ファラデー回転子は、光路上に配置される磁気光学結晶と、互いに異なる方向の第1及び第2磁界をこれらの合成磁界の強さが予め定められた値（例えば磁気光学結晶の磁化の強さが飽和するのに必要とされる磁界の強さに相当する値）よりも大きくなるように磁気光学結晶に対して印加する磁界印加手段と、第1及び第2磁界の強さの少なくとも一方を変化させる磁界調整手段とを含む。

【0095】尚、磁気光学結晶において磁化の強さが飽和した状態は、磁区が1つになった状態として理解する

ことができる。望ましくは、第1及び第2磁界は、磁気光学結晶を透過する光の伝搬方向を含む平面内の互いに直交する方向にそれぞれ印加される。

【0096】図25は、本発明に適用可能な可変ファラデー回転子32の一構成例を示す図である。可変ファラデー回転子32は、可変ファラデー回転子FRあるいは可変ファラデー回転子8として用いることができる。

【0097】ファラデー回転子32は、磁気光学結晶41と、磁気光学結晶41に対して互いに直交する方向に磁界を印加する永久磁石42及び電磁石43と、電磁石43に駆動電流を与える可変電流源44とを含む。

【0098】磁気光学結晶41として、薄く切り出したYIG（イットリウム鉄ガーネット）やエビタキシャル結晶成長させた $(\text{GdBi})_3(\text{FeAlGa})_5\text{O}_{12}$ 等を用いることにより、駆動電流を小さく抑えることができる。

【0099】磁気光学結晶41の厚み方向は例えばY軸と平行であり、この場合、永久磁石42及び電磁石43により磁気光学結晶41に印加される磁界の方向はそれぞれZ軸及びX軸と平行である。符号45は磁気光学結晶41を透過する光ビームを表している。

【0100】図26は、図25に示されるファラデー回転子32において磁気光学結晶41に与えられる磁界及び磁気光学結晶41の磁化の方向及び強さ（大きさ）を説明するための図である。

【0101】今、永久磁石42のみによって磁気光学結晶41に磁界ベクトル51が印加されている場合、磁気光学結晶41の磁化ベクトルは符号52で示されるようにZ軸に平行になる。このときの印加磁界の強さ（磁界ベクトル51の長さ）は、磁気光学結晶41の磁化の強さ（磁化ベクトル52の長さ）が飽和するように設定されている。

【0102】そして、例えばこの状態で必要な最大のファラデー回転角が得られているものとする。電磁石43により磁界ベクトル53がX軸に平行に印加されると、合成磁界は、符号54で示されるように磁界ベクトル51及び53の合成ベクトルとなる。この合成磁界54により磁気光学結晶41には磁化ベクトル55が生じる。磁化ベクトル55と磁界ベクトル54は互いに平行であり、磁化ベクトル55の長さは磁化ベクトル52の長さに一致する。

【0103】磁気光学結晶41の磁化の強さが一定であるからといって、磁気光学結晶41が与えるファラデー回転角への磁化の寄与度が同じであるとは限らない。ファラデー回転角が当該磁化の方向と光の伝搬方向との関係にも依存するからである。

【0104】即ち、磁化ベクトル52が生じている状態と磁化ベクトル55が生じている状態とを比較すると、磁化ベクトル52のZ成分（磁化ベクトル52そのものの）に対して磁化ベクトル55のZ成分56が減少して

いる分だけ、後者のファラデー回転角が小さくなるのである。

【0105】この実施形態によると、ファラデー回転角の可変範囲の全範囲に渡って常に磁気光学結晶41の磁化の強さは飽和することになるので、磁気光学結晶41に多数の磁区が形成されることに起因する不都合が生じない。即ち、ファラデー回転角の再現性が良好になり、ファラデー回転角の連続な可変が可能になる。

【0106】また、可変電流源44から供給される駆動電流を調整することで、ファラデー回転角を連続的に且つ再現性良く変化させることができるので、ファラデー回転子32を本発明に適用することによって、高速動作が可能でしかも信頼性の高い可変光学フィルタの提供が可能になる。

【0107】従って、このような可変ファラデー回転子32を本発明に適用することによって、透過率の波長特性の再現性が良く且つ波長特性の連続的な可変が可能なる可変光学フィルタの提供が可能になる。

【0108】図27は、本発明に適用可能な他のファラデー回転子32'を示す図である。ファラデー回転子32'が図25に示されるファラデー回転子32と異なる点は、磁気光学結晶41の相対する対角に互いに平行な平面61及び62を形成し、光ビーム63がこれらの平面61及び62を通過するようにしている点である。従って、永久磁石42による磁界の方向と電磁石43による磁界の方向は共に光の伝搬方向(Z軸に平行)に対して概略45°傾斜している。

【0109】図28は、図27に示されるファラデー回転子32'において磁気光学結晶41に与えられる磁界及び磁気光学結晶41の磁化の方向及び強さを説明するための図である。

【0110】電磁石43により印加される磁界は、符号71で示される状態から符号72で示される状態の範囲で強さ及び向きを調整可能である。符号73は永久磁石42による印加磁界を示している。

【0111】この場合、合成磁界については、符号74で表される状態と符号75で表される状態の間の範囲でその強さ及び方向が変化する。これに伴い、磁気光学結晶41の磁化についても、符号76で示される状態から符号77で示される状態の範囲でその強さ及び方向が変化する。

【0112】このようなファラデー回転子32を用いると、電磁石43の駆動電流の可変幅をさほど大きくすることなしに、ファラデー回転角の可変範囲を大きくすることができる。

【0113】尚、磁化の強さが最小になる符号78で示される状態(電磁石43による印加磁界が0の状態)で磁気光学結晶41の磁化の強さが十分飽和するように、永久磁石42による印加磁界が設定されている。

【0114】図29は、本発明に適用可能な更に他の可

変ファラデー回転子32''を示す図である。ファラデー回転子32''が図25のファラデー回転子32と異なる点は、図25の永久磁石42に代えて電磁石81を設け、更に電磁石81に駆動電流を与える可変電流源82を設けている点である。

【0115】図30は、図29に示されるファラデー回転子32''において磁気光学結晶41に与えられる磁界及び磁気光学結晶41の磁化の方向及び強さを説明するための図である。

【0116】図29の実施形態によると、電磁石43及び81による印加磁界を調整することで、合成磁界を符号91乃至94で示すように連続的に且つ飽和磁化を保ったままに変化させることができる。これに伴い、磁気光学結晶41の磁化は符号95乃至98で示されるように連続的に変化する。

【0117】このように図30の実施形態によると、図27に示されるような複雑な形状の磁気光学結晶を用いることなしに、ファラデー回転角の可変範囲を容易に大きくすることができる。

【0118】また、ファラデー回転子32''を用いた場合、可変電流源44又は82の極性を切り換えることによって、磁気光学結晶41の磁化のZ成分の向きを変えることができるので、ファラデー回転の方向を必要に応じて変えることができる。例えば、0°を中心として±45n°(nは自然数)の範囲でファラデー回転角を変化させることができる。

【0119】従って、ファラデー回転子32''を本発明に適用することによって、例えば前述したように $\delta = \phi$ 又は $\delta = \theta$ に設定することによって、ファラデー回転角が0°のときに透過率が波長によらず一定となる。例えば、ファラデー回転子32''をシステムに組み込んだ場合、制御オフとなり可変電流源44及び82がオフとなったときに、ファラデー回転角は0°となるので、透過率が波長によらず一定となり、システムの再立ち上げ等が容易になる。

【0120】図31は本発明による可変光学フィルタの第10実施形態を示す図である。この実施形態では、第1の偏光子P1及び第2の偏光子P2としてそれぞれ複屈折物質からなるくさび板121及び122を用いている。これに伴い、光ファイバ123と、光ファイバ123から放射された光をそのビームパラメータを変更して(例えばコリメートして)くさび板121に供給するためのレンズ124と、くさび板122からのビームを集束させるためのレンズ125と、レンズ125により集束された光ビームが所定の条件の下に結合する光ファイバ126とを付加的に設けている。

【0121】くさび板121及び122は、くさび板121の頂部及び底部がそれぞれくさび板122の底部及び頂部に対向し且つ対応する面同士が互いに平行になるように配置される。即ち、くさび板121及び122は

同じ形状を有している。

【0122】くさび板121の光学軸はY軸に平行であり、くさび板122の光学軸は例えばY軸に平行である。偏光子としてのくさび板121及び122の透過軸は、偏光面が光学軸に平行な異常光線の偏光方向あるいは偏光面が光学軸に垂直な常光線の偏光方向として定義される。

【0123】光ファイバ132の励振端から放射された光は、レンズ124によりコリメートされて平行光ビームになる。このビームはビーム太さを無視して符号130で表される。ビーム130はくさび板121においてその常光線に相当するビーム131と異常光線に相当するビーム132とに分離される。

【0124】ビーム131及び132は複屈折板BP及び可変ファラデー回転子FRをこの順に通過してそれぞれビーム133及び134になる。ビーム133及び134の偏光状態は、ファラデー回転子FRによって与えられるファラデー回転角に応じて決定される。

【0125】ビーム133はくさび板122においてその常光線及び異常光線にそれぞれ相当するビーム135及び136に分離される。ビーム134はくさび板122においてその異常光線及び常光線にそれぞれ相当するビーム137及び138に分離される。

【0126】ビーム135乃至138がそれぞれ受けてきた屈折の履歴並びにくさび板121及び122の形状及び配置形態を考慮すると、ビーム135及び137は互いに平行であり、ビーム136及び138は互いに平行でない。従って、ビーム135及び137だけをレンズ125により絞り込んで光ファイバ126の励振端に結合することができる。

【0127】さて、ビーム135及び137のトータルパワーとビーム136及び138のトータルパワーの比は、ファラデー回転子FRによって与えられるファラデー回転角に依存する。例えば、ビーム133及び134がそれぞれビーム131及び132と同じ偏光面を有する直線偏光である場合には、ビーム133及び134のそれぞれ全部がビーム135及び137に変換される。

【0128】また、ビーム133及び134がそれぞれビーム131及び132の偏光面に直交する偏光面を有する直線偏光である場合には、ビーム133及び134はそれぞれ全部ビーム136及び138に変換される。

【0129】一方、ファラデー回転子FRによって与えられるファラデー回転角が一定である状態においては、ビーム135及び137のトータルパワーは、ビーム130の偏光状態に依存しない。ビーム135及び137のトータルパワーがそれらの波長に依存することはこれまでの説明から明らかである。

【0130】従って、この実施形態によると、可変光学フィルタの透過率が入力光の偏光状態に依存しないようにすることができる。即ち、偏光無依存の可変光学フィ

ルタの提供が可能になる。

【0131】図32は本発明による可変光学フィルタの第11実施形態を示す図である。ここでは、第1の偏光子P1として複屈折物質からなるくさび板141が用いられ、第2の偏光子P2として複屈折物質からなる2つのくさび板142及び143が用いられている。

【0132】くさび板141の頂部及び底部はそれぞれくさび板142の底部及び頂部に対向し、くさび板143の頂部及び底部はそれぞれくさび板142の底部及び頂部に対向している。

【0133】そして、くさび板141、142及び143のくさび角をそれぞれ θ_1 、 θ_2 及び θ_3 とし、くさび板141及び142間の距離を d_1 とし、くさび板142及び143間の距離を d_2 とするとときに、次の2つの式を満足するように各くさび板が作製され配置されている。

【0134】

$$\theta_2 = \theta_1 + \theta_3, \quad d_1 \sin \theta_1 = d_2 \sin \theta_3$$

くさび板141の光学軸はY軸に平行であり、くさび板142及び143の光学軸は互いに平行である。くさび板142及び143の光学軸は例えばY軸に平行である。

【0135】図31の実施形態では、くさび板121及び122間に複屈折板BP及びファラデー回転子FRを設けるためにくさび板121及び122間の距離を比較的大きくせざるを得ない。従って、ビーム135及び137間の距離も比較的大きくなり、レンズ125の球面収差等の収差の影響を受けやすくなる。

【0136】図32の実施形態による場合、レンズ124からのビームをくさび板141で偏光分離してくさび板142及び143により偏光合成したときに、くさび板143から出力する常光線成分及び異常光線成分の光路はほぼ一致するので、これらをレンズ125によりその収差の影響をほとんど受けることなしに効率よく光ファイバ126に入射させることができる。

【0137】図33は本発明による可変光学フィルタの第12実施形態を示す図である。ここでは、第1の偏光子P1及び第2の偏光子P2としてそれぞれ複屈折物質からなる平板151及び152が用いられている。

【0138】平板151及び152の厚みは等しい。平板151及び152の光学軸は、例えば、互いに直交し且つ各光学軸がそれぞれZ軸に対して 45° 傾斜するように設定されている。

【0139】偏光子としての平板151及び152の各々の透過軸は、偏光面が光学軸に平行な異常光線の偏光方向あるいは偏光面が光学軸に垂直な常光線の偏光方向として定義される。光ファイバ123の励振端から放射された光は、レンズ124によりそのビームパラメータを変更されて、例えば収束しつつあるビーム160になる。ビーム160は平板151においてその常光線及び

異常光線にそれぞれ相当するビーム 1 6 1 及び 1 6 2 に分離される。ビーム 1 6 1 及び 1 6 2 は互いに平行である。

【0140】ビーム 1 6 1 及び 1 6 2 は、複屈折板 BP 及びファラデー回転子 FR をこの順に通過してそれぞれビーム 1 6 3 及び 1 6 4 になる。ビーム 1 6 3 及び 1 6 4 の偏光状態はファラデー回転子 FR によって与えられるファラデー回転角に応じて決定される。

【0141】ビーム 1 6 3 は平板 1 5 2 においてその常光線及び異常光線に相当するビーム 1 6 5 及び 1 6 6 に分離される。ビーム 1 6 4 は平板 1 5 2 においてその常光線及び異常光線に相当するビーム 1 6 7 及び 1 6 8 に分離される。

【0142】平板 1 5 1 及び 1 5 2 は互いに平行でありこれらの Z 軸方向の厚みは等しいので、ビーム 1 6 5 はビーム 1 6 8 に一致する。従って、ビーム 1 6 5 及び 1 6 8 だけをレンズ 1 2 5 により絞り込んで光ファイバ 1 2 6 に入射させることができる。

【0143】さて、ビーム 1 6 5 及び 1 6 8 のトータルパワーとビーム 1 6 6 及び 1 6 7 のトータルパワーの比は、ファラデー回転子 FR によって与えられるファラデー回転角に依存する。

【0144】一方、ファラデー回転子 FR によって与えられるファラデー回転角が一定である状態においては、ビーム 1 6 5 及び 1 6 8 のトータルパワーは、ビーム 1 6 0 の偏光状態には依存しない。ビーム 1 6 5 及び 1 6 8 のトータルパワーがそれらの波長に依存することはこれまでの説明から明らかである。

【0145】従って、この実施形態によっても、偏光無依存的可変光学フィルタの提供が可能になる。尚、各偏光子として複屈折物質からなる平板を用いる場合には、 $1/2$ 波長板を付加的に設けることにより種々の配置形態を採用することができる。

【0146】図 3 4 の (A) 及び (B) は本発明による可変光学フィルタの第 1 3 実施形態を説明するための図である。図 3 4 の (A) に示されているのは、図 3 1 の第 1 0 実施形態に対応しており、図 3 4 の (B) に示されているが第 1 3 実施形態である。

【0147】図 3 4 の (A) では、くさび板 1 2 1 及び 1 2 2 の各々の偏光分離角度あるいはくさび角は θ' であり、ビーム 1 3 5 及び 1 3 7 はレンズ 1 2 5 により光ファイバ 1 2 6 に結合するのに対してビーム 1 3 6 及び 1 3 8 は光ファイバ 1 2 6 には結合しない。

【0148】ここで、図 3 4 の (B) に示されるように、各々角 θ' よりも小さい角 θ'' を有するくさび板 1 2 1' 及び 1 2 2' を用いるものとする。このとき、くさび板 1 2 2' からはビーム 1 3 5' 乃至 1 3 8' が出力している。ビーム 1 3 5' 及び 1 3 7' は原理的には全部レンズ 1 2 5 により光ファイバ 1 2 6 に結合する。ここでは、角 θ'' が角 θ' よりも小さいことにより、本

来光ファイバ 1 2 6 に結合させることが予定されていないビーム 1 3 6' 及び 1 3 8' の一部も光ファイバ 1 2 6 に結合するかも知れない。もしそうであれば、第 2 の偏光子 P 2 として部分偏光子を用いたのと同様の効果が生じることとなる。

【0149】ビーム 1 3 6' 及び 1 3 8' の一部が光ファイバ 1 2 6 に結合する条件は、光ファイバ 1 2 6 のコア径を a 、レンズ 1 2 5 の焦点距離を f とするときに、 $a > f \sin \theta''$ で与えられる。

【0150】この条件を満足することにより、第 2 の偏光子 P 2 として部分偏光子を用いたのと同じように、可変光学フィルタの平均損失を小さくすることができる。以上、本発明を種々の実施形態に基づいて説明したが、これまでの実施形態の 2 つ又はそれ以上を組み合わせる本発明を実施してもよい。

【0151】

【発明の効果】以上説明したように、本発明によると、透過率の波長特性を与える特性直線の形状が透過率の軸の方向に変化するような可変光学フィルタの提供が可能になるという効果が生じる。本発明による他の効果は以上の説明から明らかである。

【図面の簡単な説明】

【図 1】図 1 は複屈折フィルタ（従来技術）の説明図である。

【図 2】図 2 の (A) 及び図 2 の (B) は従来の変光学フィルタの特性の例を説明するための図である。

【図 3】図 3 の (A) 及び図 3 の (B) は要求されている可変光学フィルタの特性の例を説明するための図である。

【図 4】図 4 は図 1 に示される複屈折フィルタの部材間の位置関係を示す図である。

【図 5】図 5 は一次関数で近似された $(1/\lambda)$ の説明図である。

【図 6】図 6 は図 4 で定義される θ を変化させたときの透過率の波長特性の変化を示す図である。

【図 7】図 7 の (A) 及び図 7 の (B) はそれぞれ本発明による可変光学フィルタの第 1 及び第 2 実施形態を示す図である。

【図 8】図 8 は本発明による可変光学フィルタの各実施形態における部材間の位置関係を示す図である。

【図 9】図 9 は透過率の波長特性の第 1 の例を示すグラフである。

【図 10】図 10 は損失傾斜の説明図である。

【図 11】図 11 は透過率の波長特性の第 2 の例を示すグラフである。

【図 12】図 12 の (A) 及び図 12 の (B) は透過率の波長特性の第 3 の例を示すグラフである。

【図 13】図 13 は透過率の波長特性の第 4 の例を示すグラフである。

【図 14】図 14 の (A) 及び図 14 の (B) はそれぞ

れ本発明による可変光学フィルタの第3及び第4実施形態を示す図である。

【図15】図15は透過率の波長特性の第5の例を示すグラフである。

【図16】図16は透過率の波長特性の第6の例を示すグラフである。

【図17】図17は本発明による可変光学フィルタの第5実施形態を示す図である。

【図18】図18は透過率の波長特性の第7の例を示す図である。

【図19】図19は本発明による可変光学フィルタの第6実施形態を示す図である。

【図20】図20は透過率の波長特性の第8の例を示す図である。

【図21】図21は本発明による可変光学フィルタの第7実施形態を示す図である。

【図22】図22は本発明による可変光学フィルタの第8実施形態を示す図である。

【図23】図23は本発明による可変光学フィルタの第9実施形態を示す図である。

【図24】図24の(A)及び図24の(B)は図23に示される可変光学フィルタによる得られる透過率の波長特性の例を示すグラフである。

【図25】図25は本発明に適用可能なファラデー回転子を示す図である。

【図26】図26は図25における磁界及び磁化の説明図である。

【図27】図27は本発明に適用可能な他のファラデー回転子を示す図である。

【図28】図28は図27における磁界及び磁化の説明図である。

【図29】図29は本発明に適用可能な更に他のファラデー回転子を示す図である。

【図30】図30は図29における磁界及び磁化の説明図である。

【図31】図31は本発明による可変光学フィルタの第10実施形態を示す図である。

【図32】図32は本発明による可変光学フィルタの第11実施形態を示す図である。

【図33】図33は本発明による可変光学フィルタの第12実施形態を示す図である。

【図34】図34の(A)は図31に対応する可変光学フィルタを示す図であり、図34の(B)は本発明による可変光学フィルタの第13実施形態を示す図である。

【符号の説明】

P1 第1の偏光子

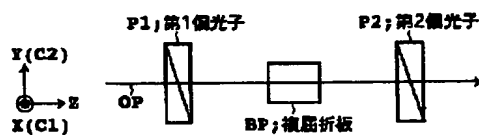
P2 第2の偏光子

BP 複屈折板

FR 可変ファラデー回転子

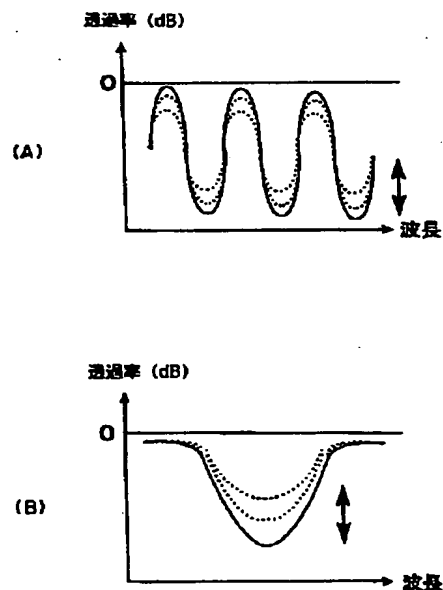
【図1】

複屈折フィルタの説明図
(従来技術)



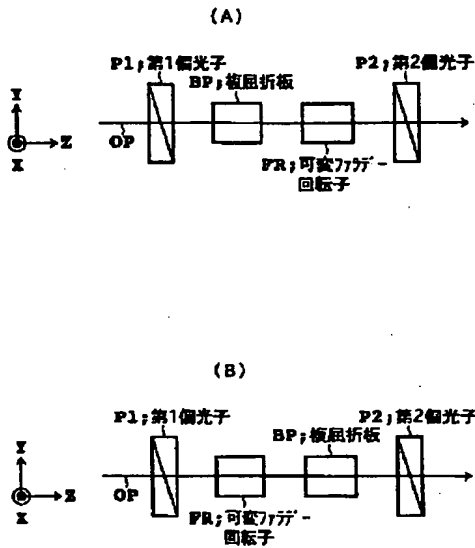
【図3】

要求されている可変光学フィルタの
特性の例を説明するための図



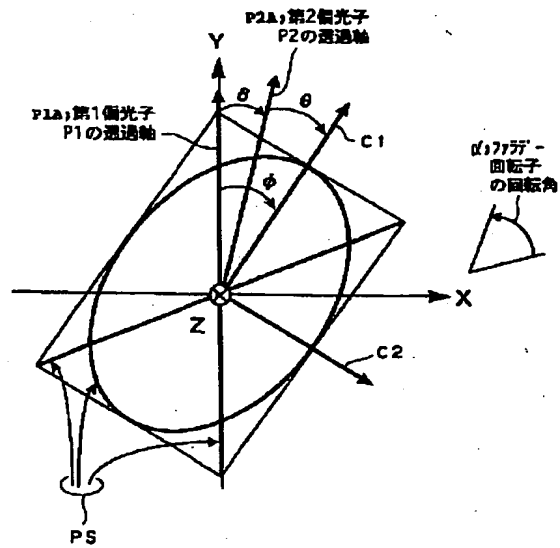
【図7】

可変光学フィルタの
第1及び第2実施形態を示す図



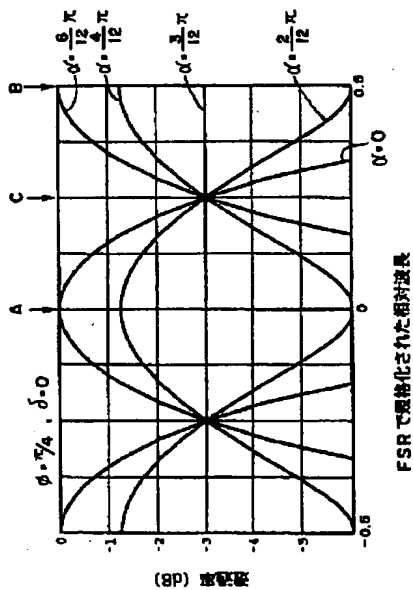
【図8】

可変光学フィルタの各実施形態における
部材間の位置関係を示す図



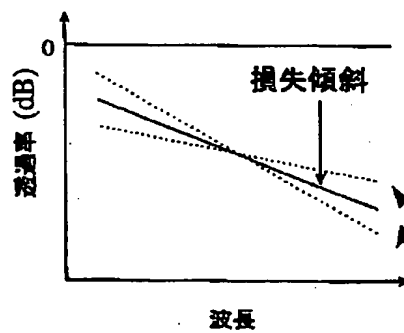
【図9】

透過率の波長特性の第1の例を示すグラフ



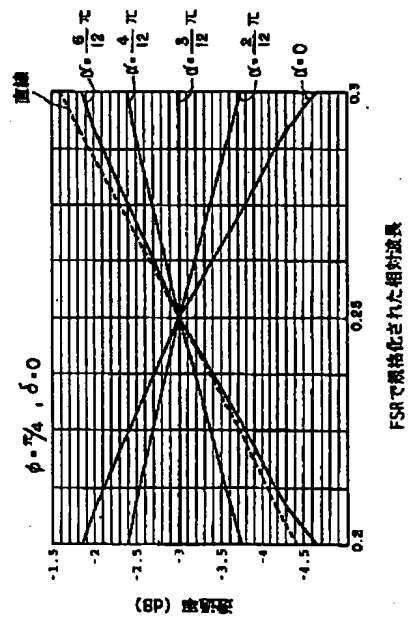
【図10】

損失傾斜の説明図



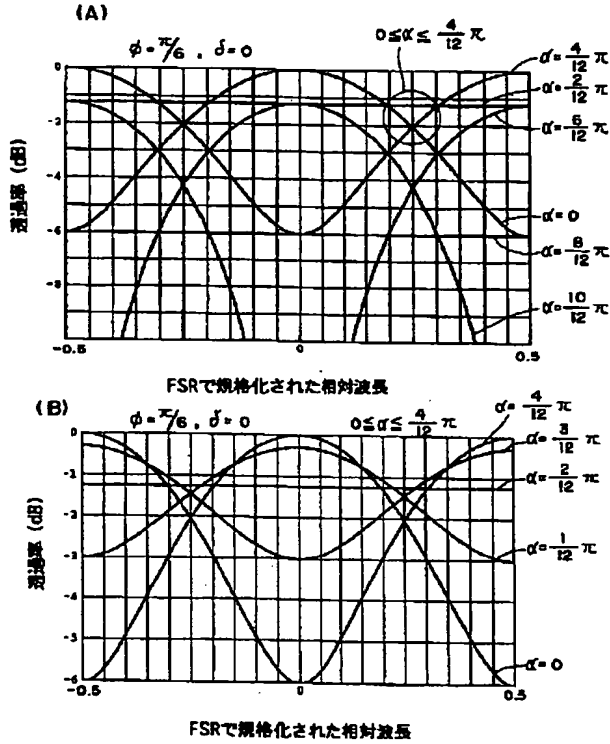
【図11】

透過率の波長特性の第2の例を示すグラフ

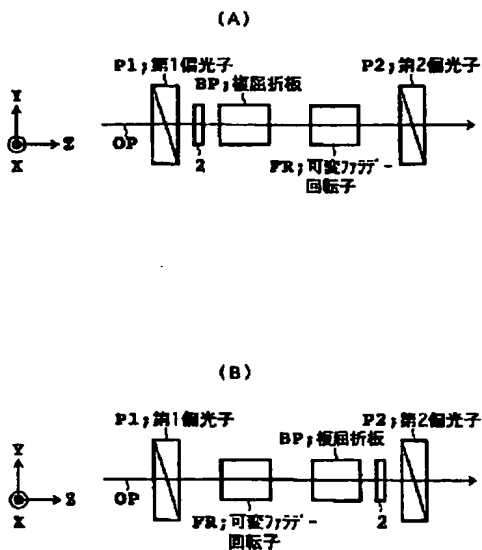


【図 12】

透過率の波長特性の第3の例を示すグラフ

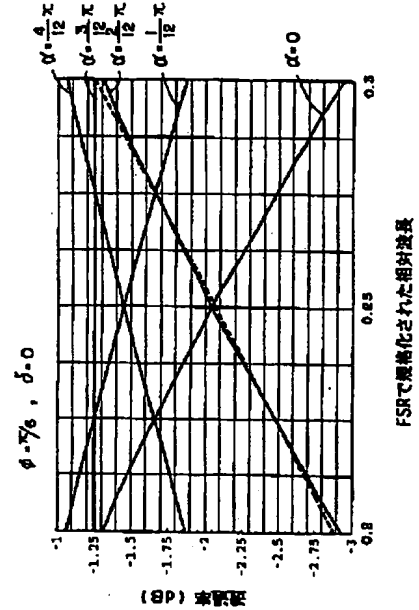


【図 14】

可変光学フィルタの
第3及び第4実施形態を示す図

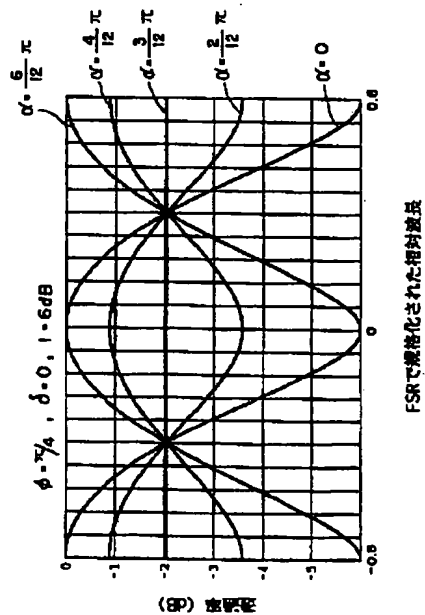
【図 13】

透過率の波長特性の第4の例を示すグラフ



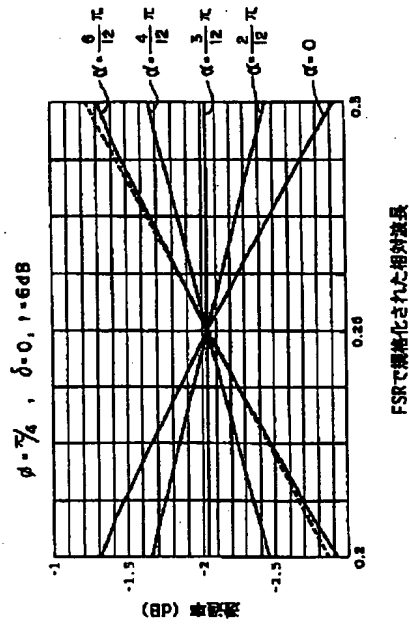
【図 15】

透過率の波長特性の第5の例を示すグラフ



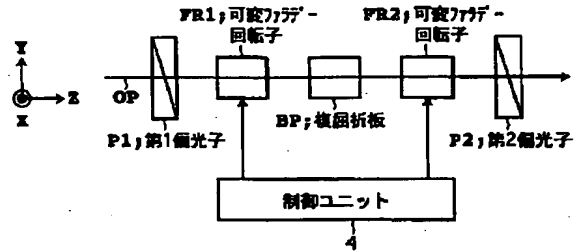
【図16】

透過率の波長特性の第6の例を示すグラフ



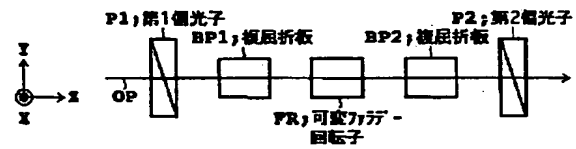
【図17】

可変光学フィルタの第5実施形態を示す図



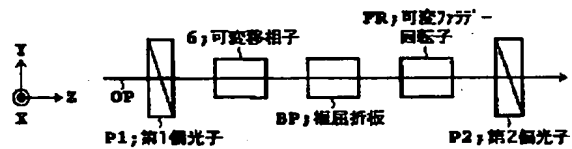
【図19】

可変光学フィルタの第6実施形態を示す図



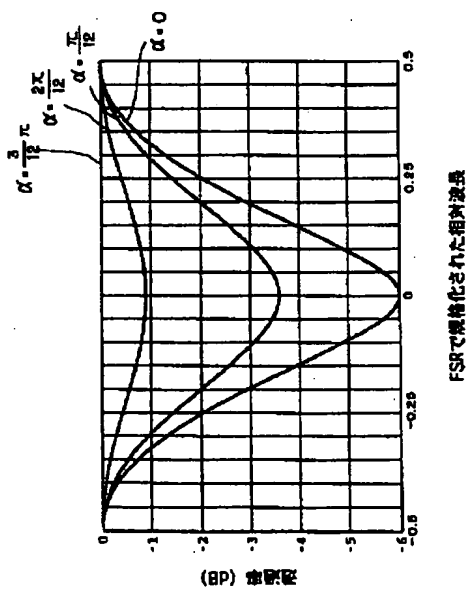
【図21】

可変光学フィルタの第7実施形態を示す図



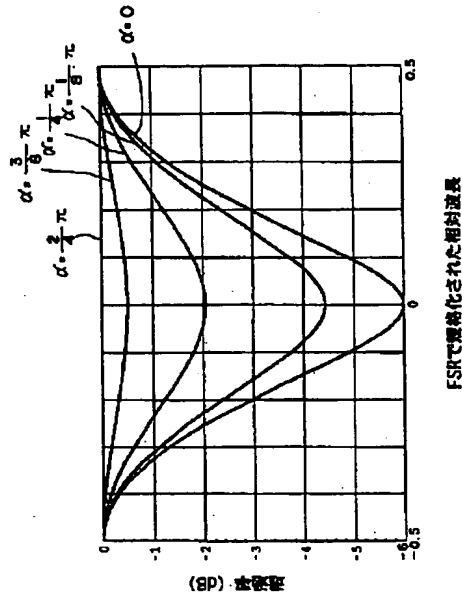
【図18】

透過率の波長特性の第7の例を示すグラフ



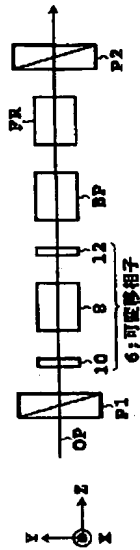
【図20】

透過率の波長特性の第8の例を示すグラフ



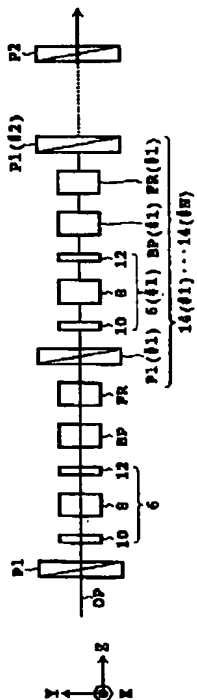
【図22】

可変光学フィルタの第8実施形態を示す図



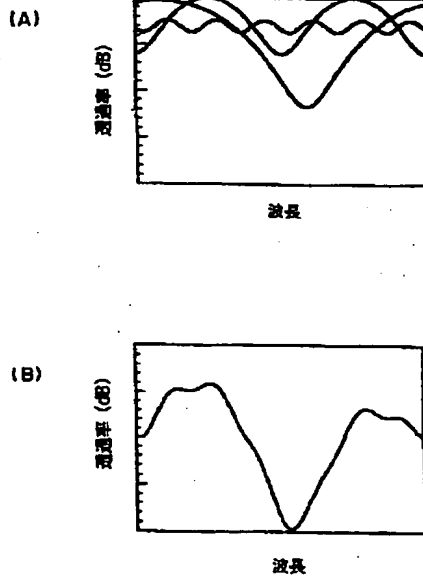
【図23】

可変光学フィルタの第9実施形態を示す図



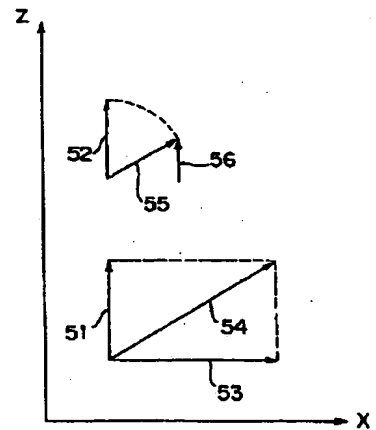
【図24】

図23に示される可変光学フィルタにより得られる透過率の波長特性の例を示すグラフ



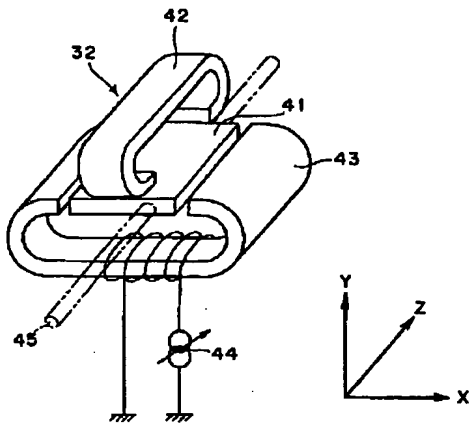
【図26】

図25における磁界及び磁化の説明図



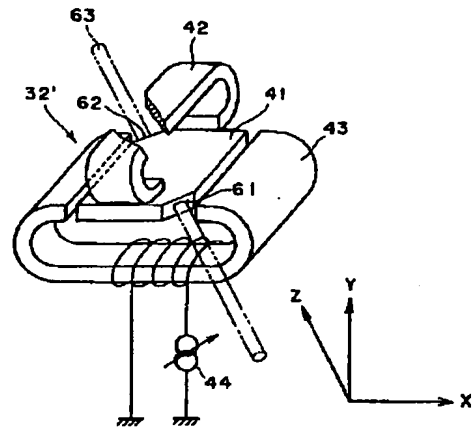
【図25】

本発明に適用可能な
ファラデー回転子を示す図



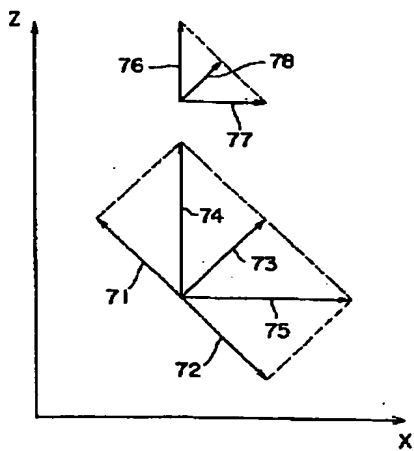
【図27】

本発明に適用可能な
他のファラデー回転子を示す図



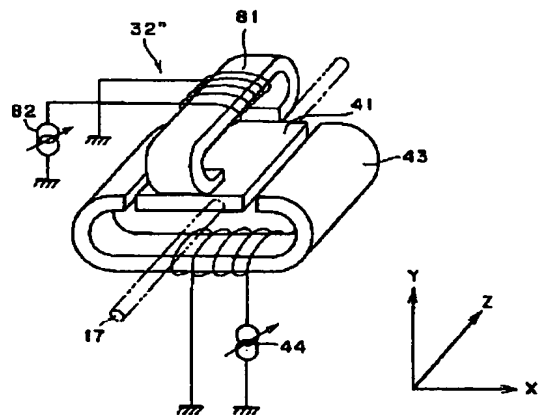
【図28】

図27における磁界及び磁化の説明図



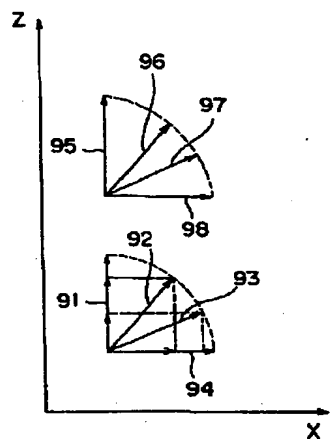
【図29】

本発明に適用可能な
更に他のファラデー回転子を示す図



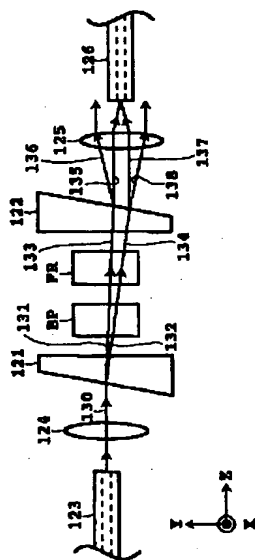
【図 30】

図29における磁界及び磁化の説明図



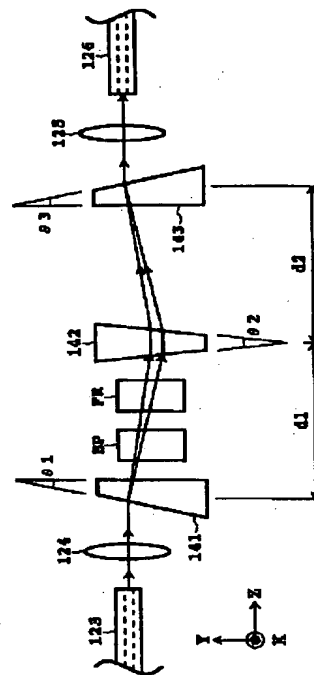
【図 31】

可変光学フィルタの第10実施形態を示す図



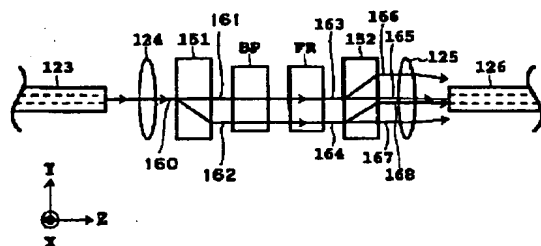
【図 32】

可変光学フィルタの第11実施形態を示す図



【図 33】

可変光学フィルタの第12実施形態を示す図



【図34】

可変光学フィルタの第13実施形態を示す図

